

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОТРЕНИРОВКИ НА НАДЕЖНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

д.ф.- м.н. проф. А.К. Гнап, Н.И. Коваленко, К.С. Клименко

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния термо-электротренировки (ТЭТ) на устойчивость интегральных микросхем (ИМС), изготовленных по биполярной и МОП – технологиям.

Интегральные микросхемы ТТЛ. ТЭТ позволяет повысить устойчивость параметров компонент ИМС (транзисторов и резисторов) при внешних воздействиях [1]. Нами проведено исследование влияния ТЭТ ИМС транзисторно-транзисторной логики типа 1ЖЛ, 1ТЛ, 341, 342, 1ТК 343, 1ТР 061 на устойчивость их статических параметров при ионизирующем воздействии. Исследовались параметры ИМС, как прошедших ТЭТ, так и не прошедших. Изменение параметров ИМС (50 шт. в партии) проводилось по стандартным схемам на измерителе параметров ИМС-1. ТЭТ ИМС проводилась в течение 8, 48, 96, 168 часов при температурах (25°C, 125°C), не выходящих за пределы допустимых по техническим условиям на ИМС ТТЛ. Во время ТЭТ ИМС были подключены к источникам стабилизированного постоянного напряжения, которые обеспечивали их рабочий режим. В качестве источника ионизирующего излучения использовались реакторные нейтроны с энергией $E=1,8$ МэВ и потоком $2 \cdot 10^9$ н·см⁻²·с⁻¹. Флюэнс изменялся от 10^{12} до $5 \cdot 10^{14}$ н·см⁻². Изучались параметры: $I_{вх}^1$ - входной ток логической единицы; $I_{вх}^0$ - входной ток логического нуля; $U_{вых}^1$ - выходное напряжение логической единицы; $U_{вых}^0$ - выходное напряжение логического нуля; I_{R2}, I_{R3} - токи через сопротивления; I_K - ток коллектора выходного транзистора; $I_{св}$ - ток связи; $I_{оп}$ - минимальный ток опорных диодов.

Ухудшение параметров у тренированных ИМС в зависимости от интегрального потока бомбардирующих частиц наблюдается в значи-

тельно меньшей степени, чем для ИМС, не прошедших ТЭТ. На рис.1, 2 показаны семейства зависимости параметров ИМС (в относительных единицах) от изменения интегрального потока нейтронов при температуре $T = +125^{\circ}\text{C}$ для различных значений времени ТЭТ. Кривая 1 показывает изменение параметра ИМС, не подвергнутых ТЭТ; кривые 2, 3, 4 показывают изменение параметра ИМС, прошедших ТЭТ, в течение 48, 96, 168 часов, соответственно.

При рассмотрении зависимостей отмечено практическое совпадение характеристик ИМС подвергнутых ТЭТ в течение 0 и 8 часов. Кривые несколько отличаются друг от друга, их отличие лежит в пределах ошибки изменения.

Выходное напряжение логической единицы определяется по формуле

$$U_{\text{вых}}^1 = U_{\text{нп}} + U_{\text{эо}} - U_{\text{д}} - R_2 \frac{I_{\text{вых}}^1}{\beta_i + 1},$$

где $U_{\text{нп}}$ – напряжение питания ИМС; $U_{\text{эо}}$ – падение напряжения на открытом эмиттерном переходе; $I_{\text{вых}}^1$ – задается схемой измерения; $U_{\text{д}}$ – падение напряжения на диоде, образованном короткозамкнутым переходом коллектор-база с эмиттером; R_2 – сопротивление резистора в цепи выходного транзистора; β_i – инверсный коэффициент усиления выходного (третьего) транзистора ИМС. При облучении, если β_i изменяется, то

$$U_{\text{вых}}^1 = U_{\text{нп}} - \frac{2mkT}{q} \ln \frac{1}{C_1 \sqrt{k_1 + \tau_n \Phi}} - R_2 \frac{I_{\text{вых}}^1 + I_{\text{KT2}}}{\beta_{\text{in}} + 1},$$

где $\beta_{\text{in}} = \beta_{i0} \left(1 - 0,575 \ln \frac{\Phi}{\Phi_0}\right)$; $C_1 = \frac{Sq^2 n^2 \rho_n \mu_n \sqrt{D_p}}{\sqrt{k\tau_n}}$; m – масса

электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд носителя; k_1 – коэффициент разветвления по выходу, характеризующий нагрузочную способность; τ_n – время жизни неосновных носителей тока; Φ – флюэнс нейтронов в заданный момент времени; I_{KT2} – коллекторный ток второго транзистора транзисторно-транзисторной логики ТТЛ; β_{i0} – инверсный коэффициент усиления при начальном флюэнсе нейтронов; Φ_0 – начальный флюэнс нейтронов; S – площадь p

- **n** перехода; **n** – концентрация носителей; ρ_n – удельное сопротивление полупроводника; μ_n – подвижность носителей; D_p – коэффициент диффузии дырок.

Минимальный ток опорного диода в прямом направлении определяется сопротивлением **p** - **n** переходов и резистора в виде меандра, включенного в цепь трех диодов, соединенных последовательно. Диоды сформированы на основе транзисторных структур (короткозамкнутых **p** - **n** переходов коллектор-база с эмиттером). Известно, что как проводимость **p**-, так и **n** - кремния падает с увеличением интегрального потока. Эмпирические зависимости [2] для удельных сопротивлений материала **p**- и **n** - типа приведены ниже:

$$\rho_n(\Phi) = \rho_n(0) \exp[1,78 \cdot 10^{-5} \rho_n(0)^{0,77} \Phi];$$

$$\rho_p(\Phi) = \rho_p(0) \exp[2,05 \cdot 10^{-15} \rho_p(0) \Phi],$$

где $\rho(0)$ и $\rho(\Phi)$ – значения удельного сопротивления – исходное и после воздействия соответствующего флюэнса. Увеличение удельного сопротивления приводит к уменьшению минимального тока опорного диода.

При наличии потенциально дефектных мест в области близких к **p** - **n** переходам минимальный ток опорного диода будет уменьшаться, т.е. должны наблюдаться точки утечки, которые частично компенсируют уменьшение тока опорных диодов. В ИМС, подвергнутых ТЭТ, с увеличением флюэнса опорный ток уменьшается более быстро, чем у не прошедших ТЭТ.

Характерно, что ток питания (для флюэнсов до $5 \cdot 10^{13}$ - 10^{14}) меньше, чем у ИМС, не прошедших ТЭТ, но с увеличением флюэнса выше 10^{14} (для разных типов ИМС) он увеличивается в 1,5-3 раза. Это может быть объяснено увеличением концентрации кластеров и электрически активных центров области **p** - **n** переходов.

Ток короткого замыкания при воздействии потоков нейтронов определяется формулой

$$I_{кз} = \frac{U_{нп} (R_3 + r_k)}{R_q R^* + R_3 (r_3 + r_k) + r_k (1 + \beta_\Phi + r_6)} \left(R^* = R_3 + R_2 + r_k (1 + \beta_\Phi) + r_6 + \frac{1 + \beta_\Phi}{2} r_3 \right)^2$$

где R_3 – сопротивление смещения в цепи выходного транзистора; r_k – сопротивление коллекторного перехода; R_q – сопротивление диода; r_6 – объемное сопротивление базы; β_Φ – коэффициент усиления выходного транзистора при воздействии флюэнса нейтронов; r_3 – сопротивление эмиттерного перехода.

Для ИМС типа 1ТК 342, 1ТК 343, прошедших ТЭТ, с увеличением флюэнса до 10^{14} ток короткого замыкания уменьшается почти в два раза (при флюэнса выше $5 \cdot 10^{14}$ н·см⁻² эта разница не увеличивается).

Входной ток логического нуля определяется формулой

$$I_{\text{вх}}^0 = \frac{1 + (M - m_0)\beta_i}{m_0} \cdot \frac{U_{\text{нп}} - U_{\text{зо}} - U_{\text{вых}}^0}{R_1 + r_6},$$

где M – общее число входов в ИМС; m_0 – число открытых входов; R_1 – сопротивление резистора в цепи базы многоэмиттерного транзистора (МЭТ).

По сравнению с ИМС, не прошедших ТЭТ, входной ток логического нуля увеличивается с ростом интегрального потока в зависимости от типа ИМС и времени ТЭТ в 1,2-1,5 раза. ТЭТ в течение 168 часов приводит к практически полной стабильности при увеличении интегрального потока.

Входной ток логической единицы определяется по формуле

$$I_{\text{вх}}^1 = \beta'_i \cdot \frac{U_{\text{нп}} - U_{\text{зо}} - U_{\text{вых}}^1}{R_1 + r_6},$$

где β'_i – инверсный коэффициент усиления (МЭТ); $U_{\text{вх}}^1$ – напряжение логической единицы на входе.

Выходной ток логической единицы для ИМС, прошедших ТЭТ, меньше, чем для неподвергнутых ТЭТ, уже при интегральных потоках больше 10^{12} н·см⁻². Наименьшие изменения наблюдаются у ИМС, тренированных в течение 168 часов.

Следует отметить, что уменьшение изменения $I_{\text{вх}}^1$ способствует увеличению помехоустойчивости ИМС относительно запирающей помехи на входе.

Ток через резисторы R_2, R_4 1ТР 061 при ТЭТ (168 час.) увеличивается, но при изменении интегрального потока остается практически постоянным. При $2 \cdot 10^{14}$ н·см⁻² наблюдается некоторое увеличение тока, что нельзя объяснить изменением сопротивления тела меандра (n -

кремния) при нейтронном облучении, о чем утверждается в работе [3]. По-видимому, увеличение сопротивления может быть связано с изменением объемной геометрии сопротивлений в процессе нейтронной бомбардировки за счет изменения концентраций носителей в области р-п переходов [4]. Коллекторный ток ИМС 1ТК 342, 1ТК 343, 1ТР 061 увеличивается в меньшей степени (ЭТТ - 96, 168 час.) по сравнению с ИМС, не прошедшими ТЭТ. Для ИМС, тренировавшихся по 8 и 48 часов, наблюдаются более значительные изменения.

Ток связи ИМС типа 1ЖЛ 341 и 1ТК 343 с увеличением флюэнса от 10^{12} до $5 \cdot 10^{14}$ н·см⁻² изменяется значительно (10 - 15 раз). ТЭТ в течение 168 часов приводит к уменьшению изменения тока связи (в 4 раза). Закономерности протекания физико-химических процессов, оказывающих влияние на работоспособность ИМС, определяются участием в них молекул, атомов, электрически активных центров, которые имеют или приобретают энергию, не меньшую некоторой величины, достаточной для преодоления энергетического барьера, препятствующего течению процесса. Перегруппировка атомов, дефектов, изменение их положения в кристаллической решетке полупроводника, характеризующая эти процессы, может происходить лишь в том случае, когда их энергия превышает определенный уровень (энергию активации), достаточный для преодоления (разрыва) связей.

Электронно-дырочный переход, изготовленный термодиффузией, можно считать, с некоторым приближением, как термодинамически неустойчивую систему. Если термодинамически устойчивая система характеризуется заданной энергией активации E_A , чему соответствует определенное число активных частиц, то неустойчивость системы приводит к вариациям уровня энергии активации (от $E_{A \min}$ до $E_{A \max}$) и к изменению концентрации активных частиц.

Распределение частиц по энергиям в этом случае уже нельзя характеризовать законом распределения по электрическим состояниям Больцмана. В нашем случае распределение частиц по энергиям в изготовленной структуре, по-видимому, можно было бы характеризовать комбинацией распределений Максвелла-Больцмана и Ферми-Дирака [5]. Поэтому при внесении в кристалл добавочной энергии (бомбардировка потоками нейтронов) в случае неустойчивости системы активация процесса дефектообразования будет идти иным путем по сравнению с термодинамически более устойчивой системой (в нашем случае это ИМС прошедших ТЭТ). Так как на систему полупроводник - дефекты - примесь, кроме градиента концентрации действуют градиенты электрического потенциала, градиенты упругих напряжений и градиенты темпе-

ратуры, то диффузия примесей и дефектов зависит от величины этих градиентов. Их влияние выражается в совпадении потока атомов, зарядов и дефектов, который добавляется к потоку, создаваемому градиентом в термодинамически устойчивой системе.

При рассмотрении результатов следует учесть физически процессы, которые могли приводить к эффекту влияния ТЭТ на радиационную стойкость (РС) микроэлектронных структур:

1. Изменение микронеоднородностей в распределении примесей в потенциально неустойчивых областях при электродиффузии.

2. Изменение микронеоднородностей в распределении поля за счет уменьшения концентраций микронеоднородностей в распределении примесей и дефектов.

3. Реализация микронеоднородностей, т.е. образование утечек и других эффектов, которые могли проявиться во время нейтронной бомбардировки.

Известно [6], что прямая связь между соседними эмиттерами входного транзистора через соединяющий их участок пассивной базы весьма мала. Но все же входы схемы ТТЛ оказываются связанными между собой. Это объясняется тем, что электроны, которые инжектируются в базу из первого эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении, попадая в коллектор, смещают коллекторный переход в прямом направлении. Так как коллекторный переход МЭТ смещается равномерно, то из коллектора происходит инжекция электронов в базы всех триодных структур, в том числе и тех, эмиттерные переходы которых смещены в обратном направлении. Эти эмиттерные переходы собирают электроны, инжектированные из коллекторного перехода. За счет этого во входных цепях закрытой схемы появляются токи. Они вредны, так как приводят к увеличению мощности, потребляемой схемой, и увеличивают $I_{n \max}$ (максимальный ток питания закрытой схемы) того эмиттера, на который подан низкий уровень напряжения. Это эквивалентно уменьшению коэффициента разветвления предыдущей схемы в $1 - \alpha_{св}$ раз ($\alpha_{св}$ – коэффициент связи между эмиттерами МЭТ).

При облучении ИМС серии 1ЖЛ 341 ток связи настолько уменьшается, что, по-видимому, вызвано некоторым изменением сопротивления р- и n-кремния при нейтронной бомбардировки и меньшим смещением коллекторного перехода в прямом направлении. Это согласуется с данными об уменьшении потребляемой мощности схем ТТЛ при облучении нейтронами.

Термоэлектротренировка ИМС (в связи с уменьшением концентрации потенциально надежных участков в области **p-n** переходов) приводит к значительному понижению тока связи при облучении (на 1-2 порядка). Можно говорить о положительном влиянии нейтронного облучения на величину тока связи и мощности, потребляемой ИМС.

Дислокация, дефекты упаковки, ямки травления и микротрещины в полупроводниковом кристалле облегчают более глубокое проникновение диффузанта в кристалл по сравнению с диффузией в бездефектную область. Эти микронеоднородности в обычных условиях и при проведении прямо - сдаточных испытаний ИМС могут не проявиться. Но при длительной работе ИМС в жестких режимах (речь идет о предельных рабочих режимах согласно техническим условиям – максимум температуры, максимум энергетической мощности), при наличии микронеоднородностей в районе **p - n** перехода, при внешних воздействиях локальные микронеоднородности могут приводить к возникновению локальных перегревов и микронеоднородностей в распределении электрических полей. Возникает потенциальная возможность отказа.

Выбросы в диффузионном профиле распределения примесей могут быть устранены или их влияние сведено к минимуму путем тренировки при повышенной мощности [7]. Вследствие такого воздействия система **p - n** переход – матричный кристалл переходит в состояние более низкое к равновесному, что должно способствовать меньшему влиянию дефектов, возникающих при ионизирующем воздействии.

В нашем случае уменьшение концентрации микронеоднородностей в диффузионном слое, по-видимому, уменьшает вероятность реализации тех потенциально возможных отказов, которые наблюдаются при воздействии облучения в ИМС, не прошедших ТЭТ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Основные качественные и количественные изменения, влияющие на радиационную стойкость в ИМС при ТЭТ наступает в течение первых 96 часов. Можно считать, что результаты воздействия ионизирующего излучения на статистические параметры имеют в своей природе следующие два аспекта:

а) поток частиц вводит радиационные дефекты в кристаллическую структуру исследуемых ИМС, вызывает ионизационные эффекты в объеме и на поверхности ИМС;

б) при бомбардировке нейтронами активизируются потенциально ненадежные места в ИМС, ухудшая параметры **p - n** переходов и изоляции, являющихся основой конструкции ИМС.

Радиоэлектронная аппаратура, собранная на основе прошедших ТЭТ ИМС, более устойчивая к воздействию нейтронного излучения, чем аппаратура, собранная на ИМС, не прошедших ТЭТ, так как в ИМС, прошедших ТЭТ, наблюдается меньше остаточных потенциально-ненадежных участков (дефектных мест, которые не выявляются при проверке системы выходного контроля).

Влияние термоэлектротренировки на РС кремниевых униполярных интегральных структур. Изучение влияния термо - полевых воздействий на РС униполярных кремниевых структур представляло двойной интерес, поскольку физические процессы в них, во-первых, определяются основными носителями тока и, во-вторых, состоянием границ раздела **Si – SiO₂**, **Al – SiO₂**, а также процесса в окисле и приповерхностном слое кремния.

На структуры интегральных МОП аналоговых переключателей серии 143 при температуре **T = +85°C** воздействовали импульсным напряжением амплитудой 4 В, скважностью 2 и периодом следования 20 мкс. Время воздействия: 312, 192, 96, 48 и 0 часов.

Термоэлектротренировка существенно меняет параметры кремниевых интегральных структур. На рис. 3 и 4 показано распределение порогового напряжения и тока утечки входа до **(а)** и после 48 **(b)** часовой ТЭТ при температуре **T = +85°C**. Стабилизация этих параметров, уменьшение утечек и уменьшение разброса в основном заканчиваются к 48 часам, в то время, как повышение РС у этих структур практически только начинается с этой длительности ТЭТ, достигая насыщения примерно к 180 часам (рис. 5, 6). На этих рисунках показана доля структур, входящих при облучении нейтронами $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ за пределы установленного уровня (**R₀ = 90 Ом**, **U_{max} = 5 В**). при этом разница между тренированными и нетренированными структурами значительно меньше, чем у биполярных ИМС, а соотношение параметров составляет при $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ не более, чем 1,3-1,5.

В результате проведенных исследований установлено:

1. ТЭТ увеличивает радиационную стойкость сплавных и диффузионных транзисторных структур.
2. Повышение радиационной стойкости биполярных ИМС ТТЛ происходит при проведении ТЭТ до 168 часов. При увеличении времени ТЭТ радиационная стойкость не улучшается.
3. Разработана термодинамика физических процессов влияния ТЭТ на радиационную стойкость полупроводниковых структур.

4. Униполярные ИМС также повышают стойкость при изменении времени ТЭТ, но механизм процессов, определяющих улучшение свойств, отличается по сравнению с биполярными структурами. Это обусловлено как тем, что носителями заряда в униполярных структурах выступают основные носители, так и свойствами окисла и границ окисел - полупроводник, металл - окисел, металл - полупроводник. В биполярных структурах они играют меньшую роль, так как в них определяющее значение имеют объемные свойства.

Таким образом, ТЭТ в вопросе повышения надежности изделий твердотельной электроники имеет два аспекта:

а) Она позволяет увеличить надежность партии полупроводниковых структур путем обработки (форсированным старением) надежных приборов со скрытыми дефектами, которые обычно проявляются в начальный период эксплуатации и отбрасывать их.

б) Она улучшает показатели надежности, устраняя (выравнивая) потенциально-надежные участки в **p - n** переходах, приводя их в равновесие с окружающей матрицей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнап А.К., Прохоров В.А. Влияние ЭТТ на радиационную стойкость ИС ТТЛ. Спецэлектроника. Серия 3, Вып. 1 (32), 1978. - С. 9.

Buchler M., Proc. IEEE, V. 56, № 10, 1968. p 174.

2. Дубовой В.К. Изменение неоднородностей удельного сопротивления в Si при нейтронном и γ -облучении.// "Радиационные эффекты в Si." Препринт ИЯИ АН УССР, Киев, 1976. - 16 с.

3. Емельянова Т.С., Копухова Е.А., Шаховцов В.И. Влияние радиационных дефектов на свойства кремниевых электронно-дырочных переходов. В сб. "Физические процессы в кристаллах с дефектами". - К.: "Наукова думка", 1982. - С. 237-252.

4. Меламедов И.М. Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. - 214 с.

5. Наумов Ю.Е. Интегральные логические схемы. – М.: Сов. Радио, 1970. - 432 с.

6. Синоров В.Ф., Пивоваров Р.П. и др. Физические основы надежности ИС. – М.: Сов. Радио, 1976. - 324 с.

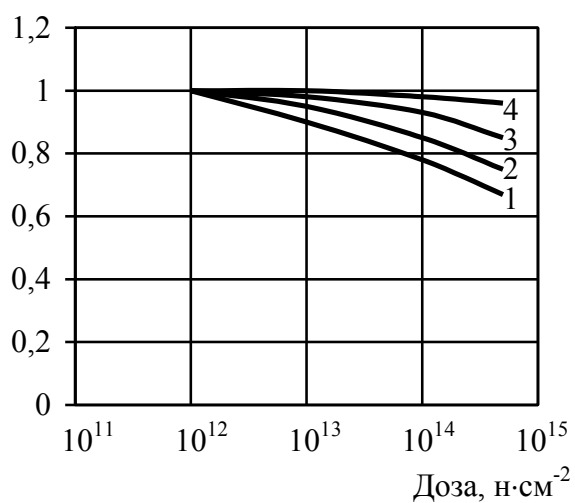


Рисунок 1 – Относительное изменение выходного напряжения логической "1"

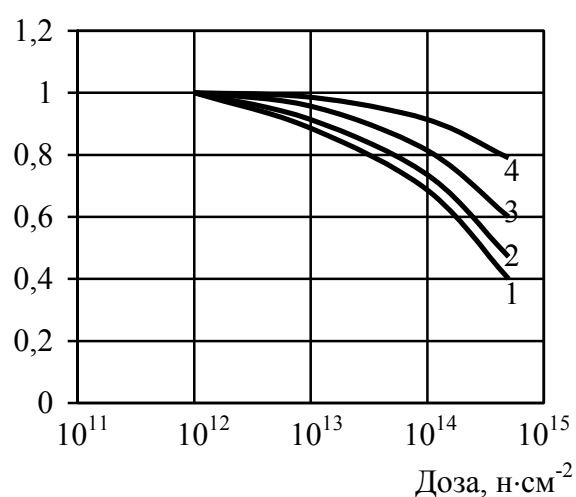


Рисунок 2 – Относительное изменение тока короткого замыкания

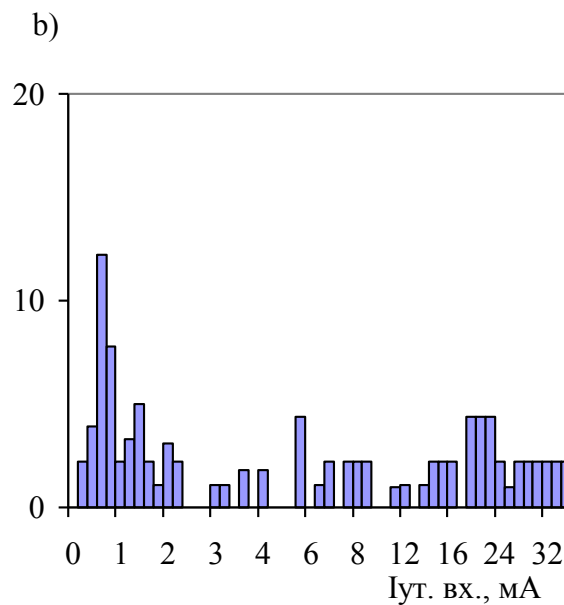
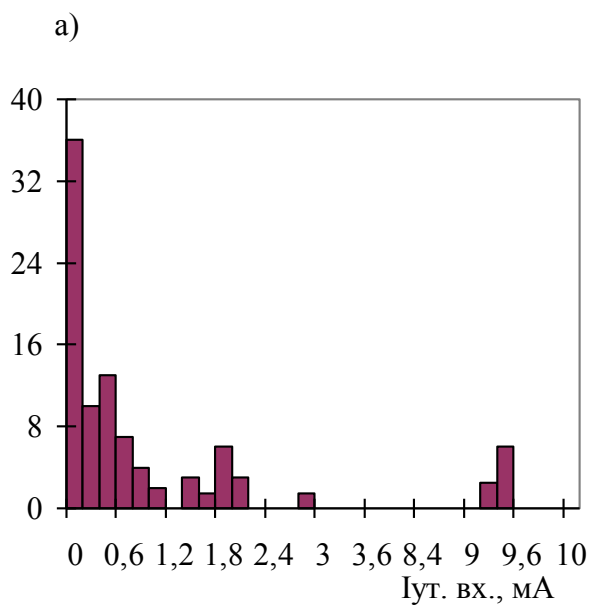


Рисунок 3 - Гистограмма распределения тока утечки на входе кремниевой интегральной МОП структуры

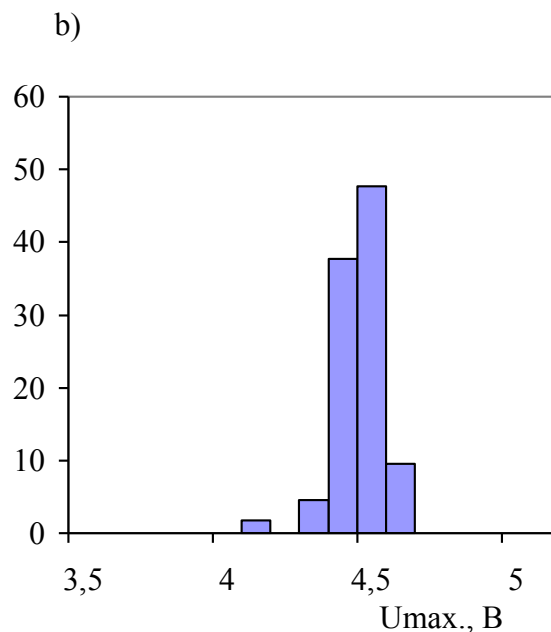
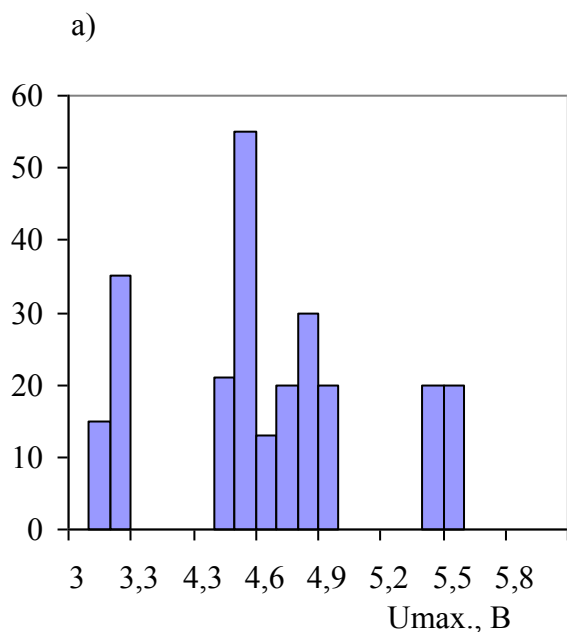


Рисунок 4 - Гистограмма распределения порогового напряжения кремниевой интегральной МОП структуры

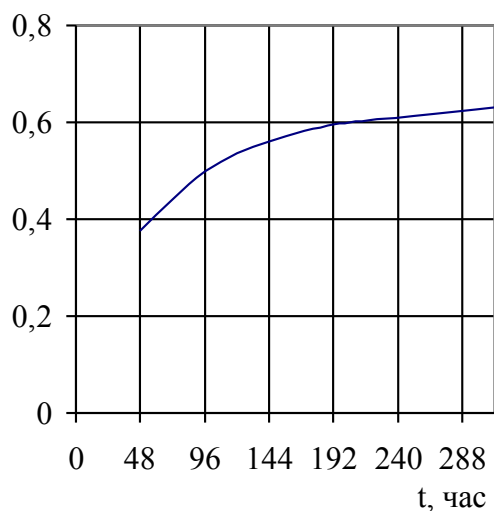


Рисунок 5 – Зависимость доли порогового напряжения кремниевой интегральной МОП структуры

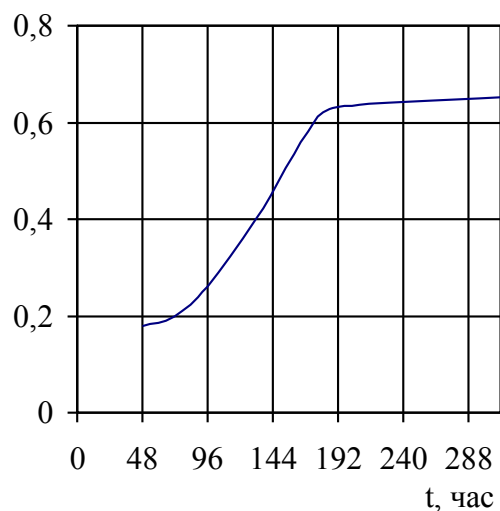


Рисунок 6 – Зависимость доли сопротивления открытого ключа кремниевой интегральной МОП структуры